

doi: 10.3788/gzxb20144304.0426001

基于扩展平均的多步相移算法及误差抑制特性比较

高芬^{1,2,3}, 蒋庄德^{1,2}, 李兵^{1,2}, 田爱玲³

(1 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

(2 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

(3 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

摘 要:为满足移相干涉测量中纳米甚至亚纳米高准确度检测要求,需采用对误差敏感度更低的相移算法.基于扩展平均技术,在传统 4 步和 3 步算法的基础上分别推导了 A 类和 B 类 5~13 步相移算法公式,以 5、6、7 和 13 步算法为例,通过仿真及数值计算,比较了两类算法对相移器移相误差及 CCD 非线性误差的抑制特性.结果表明:同类算法下,步数越多的算法,对这两项误差的抑制效果越好,但达到一定步数后对测量的影响可以忽略;B 类算法具有增强的移相误差抑制能力,在相移不准情况下可优先选用 B 类算法;A 类算法对 CCD 非线性误差几乎完全免疫,而 B 类算法受一定 CCD 非线性误差影响,但对大多数高准确度 CCD 来说,其在常规检测中的影响可以忽略;由相移噪音引入的随机性测量误差的极大值要略大于相移噪音本身,且不同算法对相移噪音的抑制效果差别不大,因此相移噪音对测量的影响不可忽略.文中给出了不同误差影响下各算法引入波面检测误差的比较数据,研究结果可为实际干涉测量中最适相移算法的使用和选用提供理论指导及数据参考.

关键词:移相干涉测量;扩展平均技术;相移算法;波面检测误差;误差分析

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)04-0426001-8

Multi-step Phase-shifting Algorithm Based on Extended Averaging Technique and its Error Suppression Characteristics Comparison

GAO Fen^{1,2,3}, JIANG Zhuang-de^{1,2}, LI Bing^{1,2}, TIAN Ai-ling³

(1 State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(3 School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: In order to meet the requirements of nano or even hypo-nano measurement accuracy in phase-shifting interferometry, multi-step phase-shifting algorithms with lower sensitivity to errors are needed. Based on traditional 4 and 3 steps algorithms, class A and class B of 5 to 13 steps phase-shifting algorithms were deduced based on extended averaging technique. Take 5, 6, 7 and 13 steps algorithms as example, suppression characteristics of algorithms to PZT phase shift error and CCD non-linearity error were compared through simulation and numerical calculation. The results show that the error suppression effect to above two error sources becomes better with the increasing of its steps, but when the steps reach a certain number, the values of errors are insignificant for the measurement. Class B algorithms have enhanced phase shift error suppression effect, and as for large phase shift error, class B algorithms are

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 51275398, 90923001)、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(No. 2011ZX04004-061)、高等学校学科创新引智计划(No. B12016)、教育部科学技术研究重大项目(No. 311001)和长江学者和创新团队发展计划(No. IRT1033)资助

第一作者:高芬(1980—),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为精密光学检测技术. Email: gaofen8128@163.com

通讯作者:李兵(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为精密测试技术. Email: lb@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期:2013-08-14; **录用日期:**2013-09-26

<http://www.photon.ac.cn>

preferred. Class A algorithms are almost completely immune to 2nd order CCD non-linearity error, class B algorithms have some sensitivity to this error, but the influence are very small for most high accuracy CCD in common measurement. Also, the phase noise should not be neglected in measurement, and maximum value of PV wavefront measurement error caused by phase shift noise is larger than the noise itself in many times calculation. Wavefront errors of different algorithms caused by different errors were acquired, and the research can provide favorable reference for the using or choosing of suitable phase-shifting algorithm in actual interferometry.

Key words: Phase-shifting interferometry; Extended averaging technique; Phase-shifting algorithms; Wavefront measurement error; Error analysis

OCIS Codes: 260.3090; 120.3180; 120.5050; 050.5080; 150.1135

0 引言

移相干涉测量技术作为一种可从干涉图中高精度复原出被测相位(波面)信息的可靠手段,被广泛应用于各类面形检测中.目前普遍采用的相移手段是利用压电陶瓷相移器(Piezoelectric Transducer, PZT)带动被测件或参考镜移动引入相移,通过 CCD 采集多幅相移干涉条纹图,再利用一定的相移算法从干涉条纹图中提取出被测相位(波面)信息.理论上不管采用何种相移算法求解得出的空间点的相位信息都是准确并且唯一的,而实际测量系统中,由于存在 PZT 移相不准、探测器非线性、环境中的振动及空气扰动等多种误差影响,使得不同算法得到的结果不同,导致检测准确度也不同.因此,开展误差不敏感相移算法及其误差抑制特性的研究对于实际干涉测量具有重要现实意义.

对比传统的 3 步和 4 步法, Hariharan 的 5 步法因 PZT 移相不准引入的波面检测误差是它本身的 2 阶小量,对移相误差起到较大的抑制作用,因而在相移干涉图像处理中得到较广泛的采用,可满足常规领域一般检测准确度需求($PV < \lambda/20$).但随着激光核聚变、极紫外光刻等多项重大工程的开展,对光学元件提出了纳米甚至亚纳米超高准确度检测需求,如作为下一代主流光刻技术的极紫外光刻中,为了同时实现大的曝光视场和高成像分辨率,其微缩投影光学系统所用光学元件的实际面形检测准确度要求达到均方根误差(Root-Mean-Square, RMS)值 0.1~0.2 nm 的水平,也由此发展了新的检测技术——相移点衍射干涉测量技术^[1-6].为满足超高准确度检测需求,干涉测量系统中需选用对误差敏感度更低的 5~13 算法.国外 ZYGO、ESDI 等公司的商业化干涉仪上为获得高准确度的测量结果多采用专业的 7 步、13 步相移算法. ESDI 开发的 Intellwave 专业干涉仪采集与分析软件上提供了 3~13 步多种相移算法可供选择,其中大部分为 Schmit 和 Creath 的多步算法.目前国内对相移算法及误差分析的研究多针对 5 步以内算法^[7-12],国外 Schmit 和 Creath 也仅给出了 5A、6A、5B 和 6B 算法公式及相移误差的比较^[13].

本文基于 Schmit 和 Creath 的扩展平均技术,开展

5~13 步相移算法研究,推导各算法公式,并对由 PZT 移相及 CCD 非线性两个主要误差源所引起的波面检测误差进行系统比较分析.

1 多步相移算法

1.1 基于扩展平均的多步相移算法设计原理

Schmit 和 Creath 扩展平均法^[13]的基本思想是多次使用平均技术,即间隔均为 $\pi/2$ 连续采集有 $M+1$ 帧干涉图像(M 取 3 或 4),若前 M 帧数据利用 M 步算法计算待测相位 φ_M 有 $\tan \varphi_M = N_1/D_1$,后 M 帧数据利用 M 步算法有 $\tan \varphi_M = N_2/D_2$,则运用 Schwider 的平均技术^[14-15]即可得到 $M+1$ 步算法公式

$$\tan \varphi_{M+1}^1 = \frac{N_1 + N_2}{D_1 + D_2} = \frac{N'}{D'} \quad (1)$$

同理,若再增加一帧数据,对后两个 M 帧数据也利用平均技术有

$$\tan \varphi_{M+1}^2 = \frac{N_2 + N_3}{D_2 + D_3} = \frac{N''}{D''} \quad (2)$$

再次运用平均技术即可得 $M+2$ 步算法公式

$$\tan \varphi_{M+2} = \frac{N' + N''}{D' + D''} = \frac{N_1 + 2N_2 + N_3}{D_1 + 2D_2 + D_3} \quad (3)$$

式中 $N_{1,2,3}$ 和 $D_{1,2,3}$ 分别为第 1、2、3 个相邻的 M 帧数据计算得到的相位表达式的分子和分母.

依次类推,即可由在 M 步算法的基础上推导出 $M+1, M+2 \dots M+N$ 步算法公式, N 为正整数.

1.2 多步相移算法公式推导

引用 Schmit 和 Creath 对算法的分类,定义由 4 步法推导的多步相移算法为 A 类算法,如 5A、6A、7A...13A 等,由 3 步法推导出的算法为 B 类算法,如 4B、5B、6B、7B...13B 等.前面的数字代表算法所使用的干涉图像帧数.

1) 以 4B~7B 算法为例,由 3 步法推导 B 类相移算法.

设 δ_i 是由第 i 步相移引入的参考相位, I_i 为对应干涉图像光强分布, $i=1, 2, \dots, n$, 则有

$$I_i = I_0 \{1 + V \cos [\varphi + \delta_i]\} \quad (4)$$

式中, I_0 表示平均(背景)光强, V 表示条纹对比度, φ 为待提取相位.

设 PZT 由初始位开始间隔 $\pi/2$ 作相移采集 n 帧数据,第 i 步相移引入的参考相位 $\delta_i = -(i-1)\pi/2, i = 1, 2, \dots, n$, 则依据式(4)及三角函数转换关系有

$$\begin{cases} I_1 = I_0 + I_0 V \cos \varphi \\ I_2 = I_0 + I_0 V \cos (\varphi - \pi/2) = I_0 + I_0 V \sin \varphi \\ I_3 = I_0 + I_0 V \cos (\varphi - 2\pi/2) = I_0 - I_0 V \cos \varphi \\ I_4 = I_0 + I_0 V \cos (\varphi - 3\pi/2) = I_0 - I_0 V \sin \varphi \\ I_5 = I_0 + I_0 V \cos (\varphi - 4\pi/2) = I_0 + I_0 V \cos \varphi \\ I_6 = I_0 + I_0 V \cos (\varphi - 5\pi/2) = I_0 + I_0 V \sin \varphi \\ I_7 = I_0 + I_0 V \cos (\varphi - 6\pi/2) = I_0 - I_0 V \cos \varphi \\ I_8 = I_0 + I_0 V \cos (\varphi - 7\pi/2) = I_0 - I_0 V \sin \varphi \\ \dots\dots \\ I_n = I_0 + I_0 V \cos [\varphi - (n-1)\pi/2] \end{cases} \quad (5)$$

对于每相邻的三帧图像 $(I_1, I_2, I_3), (I_2, I_3, I_4), (I_3, I_4, I_5) \dots (I_{n-2}, I_{n-1}, I_n)$ 均可利用传统 3 步法求得一个 φ 值,对应为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots \varphi_{n-2}$. 要获得 4B~7B 相移算法,需采集 $n=7$ 帧数据,即有

$$\begin{cases} \tan \varphi_1 = \frac{2I_2 - I_1 - I_3}{I_1 - I_3} = \frac{N_1}{D_1} \\ \tan \varphi_2 = \frac{I_2 - I_4}{I_2 + I_4 - 2I_3} = \frac{N_2}{D_2} \\ \tan \varphi_3 = \frac{I_3 + I_5 - 2I_4}{I_5 - I_3} = \frac{N_3}{D_3} \\ \tan \varphi_4 = \frac{I_6 - I_4}{2I_5 - I_4 - I_6} = \frac{N_4}{D_4} \\ \tan \varphi_5 = \frac{2I_6 - I_5 - I_7}{I_5 - I_7} = \frac{N_5}{D_5} \end{cases} \quad (6)$$

式中, N_i 为对应各表达式的分子项, D_i 为对应各表达式的分母项, $i=1, 2, \dots, n-2$.

则依据扩展平均法原理,即可得到 4B~7B 算法公式

$$\tan \varphi_{1B}^1 = \frac{N_1 + N_2}{D_1 + D_2} = \frac{3I_2 - I_4 - I_1 - I_3}{I_1 + I_2 - 3I_3 + I_4} \quad (7)$$

$$\tan \varphi_{5B}^1 = \frac{N_1 + 2N_2 + N_3}{D_1 + 2D_2 + D_3} = \frac{-I_1 + 4I_2 - 4I_4 + I_5}{I_1 + 2I_2 - 6I_3 + 2I_4 + I_5} = \frac{N'_{5B}}{D'_{5B}} \quad (8)$$

$$\tan \varphi_{5B}^2 = \frac{N_2 + 2N_3 + N_4}{D_2 + 2D_3 + D_4} = \frac{I_2 + 2I_3 - 6I_4 + 2I_5 + I_6}{I_2 - 4I_3 + 4I_5 - I_6} = \frac{N''_{5B}}{D''_{5B}} \quad (9)$$

$$\tan \varphi_{5B}^3 = \frac{N_3 + 2N_4 + N_5}{D_3 + 2D_4 + D_5} = \frac{I_2 + 2I_3 - 6I_4 + 2I_5 + I_6}{I_2 - 4I_3 + 4I_5 - I_6} = \frac{N'''_{5B}}{D'''_{5B}} \quad (10)$$

$$\tan \varphi_{6B}^1 = \frac{N'_{5B} + N''_{5B}}{D'_{5B} + D''_{5B}} = \frac{N_1 + 3N_2 + 3N_3 + N_4}{D_1 + 3D_2 + 3D_3 + D_4} = \frac{-I_1 + 5I_2 + 2I_3 - 10I_4 + 3I_5 + I_6}{I_1 + 3I_2 - 10I_3 + 2I_4 + 5I_5 - I_6} = \frac{N'_{6B}}{D'_{6B}} \quad (11)$$

$$\tan \varphi_{6B}^2 = \frac{N'_{5B} + N''_{5B}}{D'_{5B} + D''_{5B}} = \frac{N_2 + 3N_3 + 3N_4 + N_5}{D_2 + 3D_3 + 3D_4 + D_5} = \frac{I_2 + 3I_3 - 10I_4 + 2I_5 + 5I_6 - I_7}{I_2 - 5I_3 - 2I_4 + 10I_5 - 3I_6 - I_7} = \frac{N''_{6B}}{D''_{6B}} \quad (12)$$

$$\tan \varphi_{7B} = \frac{N'_{6B} + N''_{6B}}{D'_{6B} + D''_{6B}} = \frac{-I_1 + 6I_2 + 5I_3 - 20I_4 + 5I_5 + 6I_6 - I_7}{I_1 + 4I_2 - 15I_3 + 15I_5 - 4I_6 - I_7} \quad (13)$$

式中用 $\varphi_{(M+N)B}^k$ 表示 B 类算法中用第 k 个 $M+N$ 步算法计算得到的待测相位, $M=3, N=1, 2, 3 \dots, k=1, 2, 3 \dots, k=1$ 时 $\tan \varphi_{(M+N)B}^k$ 即对应为 $M+N$ 步 B 类算法公式.

基于扩展平均法原理可导出 B 类更多步数算法公式. 原理同上,对于每相邻四帧图 $(I_1, I_2, I_3, I_4), (I_2, I_3, I_4, I_5), (I_3, I_4, I_5, I_6) \dots (I_{n-3}, I_{n-2}, I_{n-1}, I_n)$ 利用传统四步法均可求得对应的 φ 值,对应为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots \varphi_{n-3}$, 同样依据扩展平均法原理,即可得到 5A, 6A, 7A \dots 13A 等 A 类算法公式.

表 1 给出了 5A, 6A, 7A, 13A, 5B, 6B, 7B 和 13B 算法公式.

表 1 多步相移算法公式

Table 1 Formula of Multi-step phase-shifting algorithm	
Algorithm	Formula ($\tan \varphi$)
5A	$\frac{2I_2 - 2I_4}{I_1 - 2I_3 + I_5}$
6A	$\frac{3I_2 - 4I_4 + I_6}{I_1 - 4I_3 + 3I_5}$
7A	$\frac{4I_2 - 8I_4 + 4I_6}{I_1 - 7I_3 + 7I_5 - I_7}$
13A	$\frac{10I_2 - 130I_4 + 372I_6 - 372I_8 + 130I_{10} - 10I_{12}}{I_1 - 46I_3 + 255I_5 - 420I_7 + 255I_9 - 46I_{11} + I_{13}}$
5B	$\frac{-I_1 + 4I_2 - 4I_4 + I_5}{I_1 + 2I_2 - 6I_3 + 2I_4 + I_5}$
6B	$\frac{-I_1 + 5I_2 + 2I_3 - 10I_4 + 3I_5 + I_6}{I_1 + 3I_2 - 10I_3 + 2I_4 + 5I_5 - I_6}$
7B	$\frac{-I_1 + 6I_2 + 5I_3 - 20I_4 + 5I_5 + 6I_6 - I_7}{I_1 + 4I_2 - 15I_3 + 15I_5 - 4I_6 - I_7}$
13B	$\frac{-I_1 + 12I_2 + 44I_3 - 220I_4 - 165I_5 + 792I_6 - 792I_8 + 165I_9 + 220I_{10} - 44I_{11} - 12I_{12} + I_{13}}{I_1 + 10I_2 - 66I_3 - 110I_4 + 495I_5 + 132I_6 - 924I_7 + 132I_8 + 495I_9 - 110I_{10} - 66I_{11} + 10I_{12} + I_{13}}$

通过比较算法公式可知, 5A 算法即为经典的 Hariharan 5 步法.

表 1 所列算法公式为 PZT 移动时引入的参考相位为相对初始相位减小的情况(PZT 后移), 若 PZT 反方向移动(PZT 前移), 则 δ_i 取正值, 即 $\delta_i = (i-1)\pi/2$ 时, 只需在相应计算公式前添加负号即可.

2 多步相移算法误差抑制特性分析

实际的相移干涉测量受多种误差因素影响, 如

PZT 移相不准、CCD 非线性误差、光源波动、光学元件固定不当、环境振动及空气扰动等,使得用不同算法得到的结果不同,由此导致干涉测量准确度也不同,其中 PZT 移相不准及 CCD 非线性是影响相移算法准确度的主要误差源^[13]. 选取 5A、5B、6A、6B、7A、7B、13A 和 13B 算法进行这两项误差影响的比较分析.

用指定 36 项 Zernike 多项式系数拟合出来的波面作为理想待测面形,在此基础上利用 MATLAB 分别仿真一组无误差的理想干涉条纹图和不同误差影响下的干涉条纹图,相移间隔均为 $\pi/2$. 图 1 为其中仿真的一幅理想干涉图(I_1),干涉图内条纹数为 5,干涉条纹像空间尺寸 256×256 ,用设计的各相移算法分别进行相位提取后获得引入的波面检测误差分布,提取第 128 行进行二维误差比较.

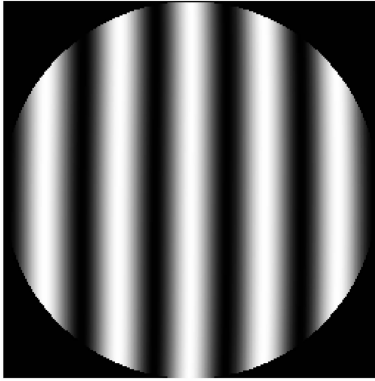


图 1 理想干涉条纹仿真 I_1

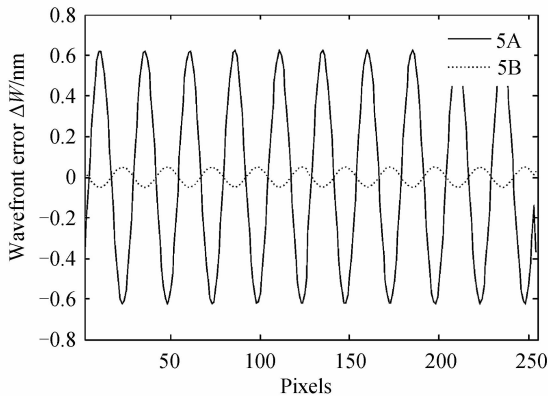
Fig. 1 Simulation of ideal interference fringe I_1

设误差影响下提取得到的实际相位为 φ' ,无误差影响提取得到的理想相位为 φ ,则由误差源引起的相位检测误差为

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi \quad (14)$$

$\Delta\varphi$ 的单位为 rad. 为直观反应对应波面误差的大小,取波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,得到误差源引起的波面检测误差为

$$\Delta W = \Delta\varphi / 2\pi \cdot \lambda \quad (15)$$



(a) 5A&5B

ΔW 的单位为 nm.

2.1 PZT 移相误差

移相干涉测量系统中主要利用 PZT 带动被测件或参考镜移动实现相移,PZT 存在线性和非线性位移误差是限制相移测量准确度的主要因素之一.此外,PZT 中 AD 及 DA 转换还会引入一定的电气噪音,该噪音引入误差为随机误差,对测量的影响不可忽略.综合考虑上述误差影响,实际相移量可表示为

$$\delta'_i = \delta_i (1 + \epsilon_1 + \epsilon_2 \delta_i) + n_i \quad (16)$$

式中, δ'_i 表示存在相移误差时第 i 步相移引入的实际参考相位; δ_i 为第 i 步相移引入的理想参考相位, $\delta_i = (i-1)\pi/2$ 相移, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为干涉条纹图采集帧数; ϵ_1 是 PZT 归一化线性误差系数,由 PZT 的标定不准导致, ϵ_2 为 PZT 归一化二阶非线性误差系数, n_i 为相移噪音,属于随机量.

式(4)可知,第 i 步相移对应干涉图像的实际光强分布为

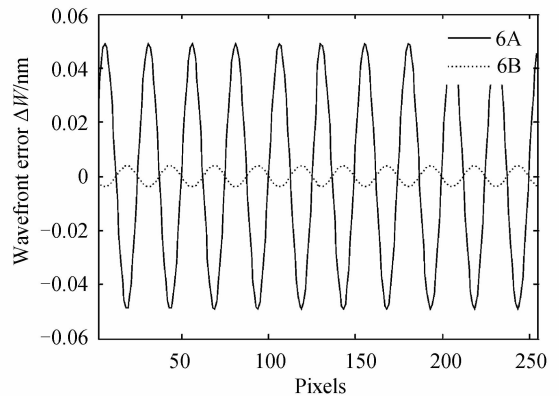
$$I'_i = I_0 \{1 + V \cos [\varphi + \delta_i (1 + \epsilon_1 + \epsilon_2 \delta_i) + n_i]\} \quad (17)$$

2.1.1 PZT 线性和非线性相移误差影响

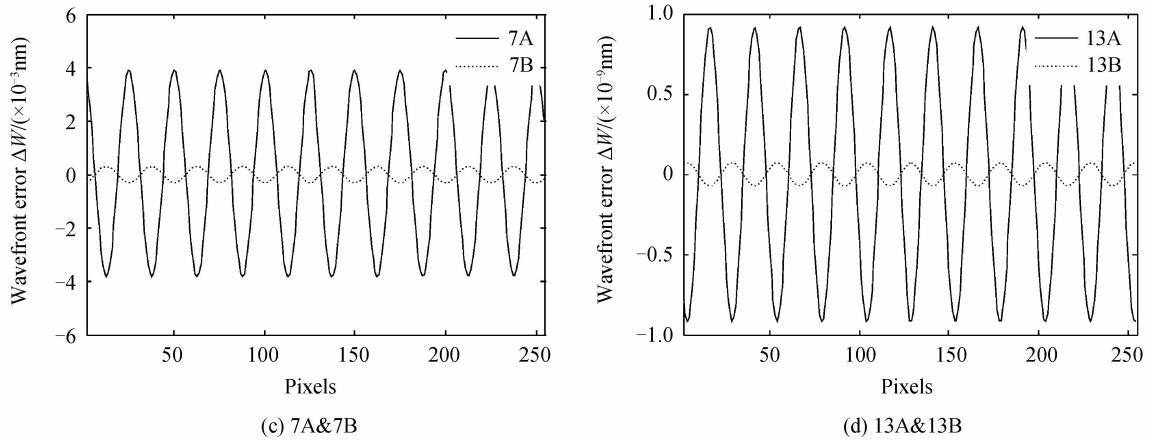
图 2 为 PZT 线性误差系数 $\epsilon_1 = 0.1$ 及 $\epsilon_2 = 0$ 时各算法引入的波面检测误差仿真结果,误差的 PV 值如表 2 第 2 列.

表 2 不同误差下各算法引入的波面误差 PV 值
Table 2 PV wavefront measurement error of different algorithms which caused by different error

Algorithms	PV wavefront measurement error/nm		
	$\epsilon_1 = 0.1,$ $\epsilon_2 = 0$	$\epsilon_1 = 0,$ $\epsilon_2 = 0.01$	$\pm 1 \text{ nm}$ phase shift noise (100 times average)
5A	1.2472	2.5126	0.4021
6A	0.098 2	0.462 8	0.396 5
7A	0.007 7	0.115 5	0.396 5
13A	1.8361e-09	5.6309e-004	0.346 8
5B	0.098 2	0.389 1	0.504 1
6B	0.007 7	0.124 3	0.481 8
7B	6.0818e-04	0.038 5	0.466 5
13B	1.4465e-010	2.8189e-004	0.386 4



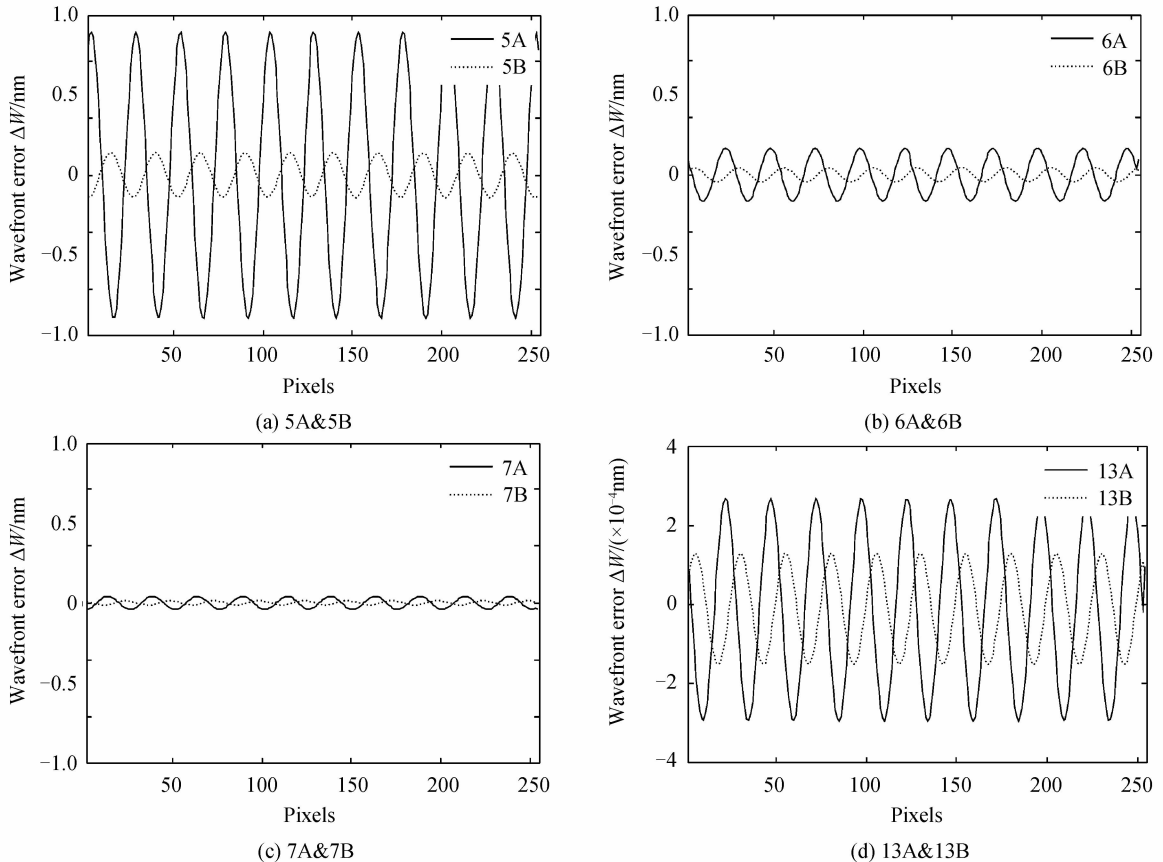
(b) 6A&6B

图2 PZT 线性误差系数 $\epsilon_1=0.1$ 时各算法引入的波面误差Fig. 2 Wavefront measurement error of different algorithms which caused by linear phase shift error when $\epsilon_1=0.1$

从图2可以看出,相同的PZT线性误差下,各算法产生的波面误差均为简谐周期函数,其频率均为干涉条纹频率的两倍;同一类型相移算法下,选择步数越多的算法,引入的波面检测误差越小,即对PZT线性误差的抑制效果越好,每增加一步,误差减小近一个数量级;同样步数情况下,B类算法产生的误差比A类算法误差小近一个数量级;比较5B和6A、6B和7A误差

曲线可知,5B算法与6A算法产生的误差相同,6B算法产生的误差与7A算法相同,因此要达到同样的误差抑制效果,B类算法比A类算法可少用一帧干涉图,即B类算法对相移器线性误差有增强的抑制效果。

同理,仿真各算法对PZT二阶非线性误差的抑制特性,仿真结果如图3,各算法引入波面误差的PV值如表2第3列。

图3 PZT 非线性误差系数 $\epsilon_2=0.01$ 时各算法引入的误差Fig. 3 Wavefront measurement error of different algorithms which caused by 2nd nonlinear phase shift error when $\epsilon_2=0.01$

比较图3中PZT二阶非线性误差系数 $\epsilon_2=0.01$ 时两类算法产生的各波面误差曲线可知:PZT二阶非

线性误差影响下各算法产生的波面误差同样为频率为干涉条纹频率的两倍的简谐周期函数,同一类型相移

算法下,选择的步数越多的算法,引入的误差越小,即对PZT非线性误差的抑制效果越好,但每增加一步,误差减小至1/3~1/6之间不等;相同步数情况下,5B算法相比5A类算法对误差的抑制效果要显著,5B算法与6A算法,6B算法与7A算法产生的误差接近,可见B类算法同样对PZT二阶非线性误差有增强的抑制效果.

图4为PZT线性误差系数 ϵ_1 在 ± 0.1 之间取值时不同算法产生的波面误差PV值比较.图5为PZT二阶非线性误差系数 ϵ_2 在 ± 0.01 之间取值时不同算法产生的波面误差PV值比较.

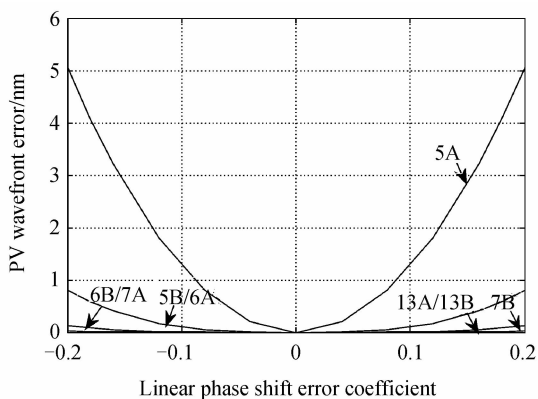


图4 不同PZT线性误差下各算法产生的波面误差
Fig. 4 PV wavefront measurement error of different algorithms which caused by different linear phase shift error

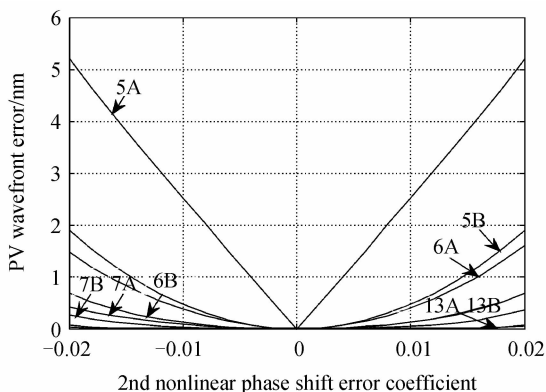


图5 不同PZT二阶非线性误差下各算法产生的波面误差
Fig. 5 PV wavefront measurement error of different algorithms which caused by different 2nd nonlinear phase shift error

从图4、图5中可以看出:当PZT存在较大相移误差时,传统的 Hariharan 5步法(即5A算法)将引入较大误差,应优先选用B类算法,当线性误差系数在0.2以内,二阶非线性误差系数在0.02以内的大相移误差下,选用5B或6A以上算法可达到3 nm($PV < \lambda/200$, $\lambda = 0.6328$ nm)以下误差,已可满足常规领域检测准确度($PV < \lambda/20$)需求.由于高准确度的干涉测量系统中一般采用进口高准确度PZT,该类PZT一般已经过精确标定,主要存在非线性误差,对于非线性误差在0.01%~0.02%的PZT,若选用5B或6A算法,由相

移不准引入的误差一般已不超过1 nm,可满足常规检测需求,若选用7A、7B及以上算法,可达到亚纳米量级,可满足纳米以下超高准确度检测需求.

2.1.2 PZT相移噪音影响

PZT中AD及DA转换引入的电气噪音为随机量,这里引入 ± 1 nm的随机噪音,仿真分析各算法产生的波面误差.经100次仿真计算可知:各算法产生的波面误差的PV值均为0~1.230 9 nm之间的随机值,即由相移噪音引入的随机性测量误差的极大值要略大于相移噪音本身.图6为5A和5B算法100次计算得到的波面误差PV结果.可见,A类算法和B类算法对相移噪音误差的抑制效果差别不大.

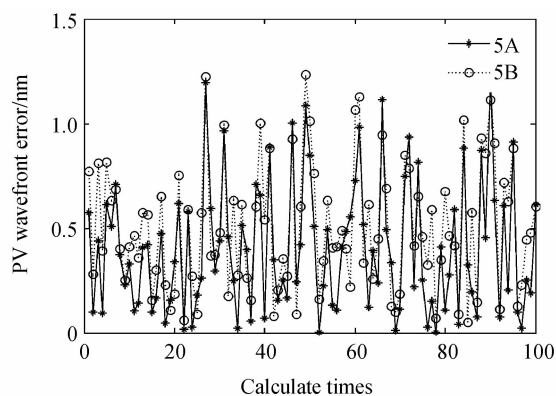


图6 ± 1 nm相移噪音下100次计算波面误差PV值
Fig. 6 PV wavefront measurement error caused by ± 1 nm phase shift noise within 100 times calculation

通过多次计算平均可减小随机误差的影响,各算法100次计算的PV误差均值如表2第4列.从表中可以看出:相同步数下,B类算法误差比A类算法误差稍大,即A类算法比B类算法对随机误差的抑制效果稍好;同类算法下,步数越多的算法产生的误差越小,对误差抑制效果越好,但不同类型不同步数的算法对随机噪音的抑制效果差别不大.可见对于纳米以下高精度测量来说相移器随机误差为主要相移误差源之一,不可忽略.因此在实际相移器选型中应尽量选用电气噪音小的相移器.

2.2 CCD非线性误差

相移干涉仪一般采用CCD作为探测器来采集干涉条纹.因为半导体器件都存在一定的非线性,其表现为输入光强和输出电压信号的非线性.虽然大部分CCD都有增益调节及曲线校正,但是这种误差还是不可消除的,会最终对检测准确度造成影响,这也是移相干涉中一个重要的误差源.选择合适的算法适当地抑制这项误差产生的影响,有益于整体提高系统检测准确度.探测器的非线性误差主要考虑二阶误差,则可将探测器实际输出光强表示为

$$I' = I(1 + \alpha I) \quad (18)$$

式中, I' 表示探测器输出光强; I 为输入光强, α 为归一

化的探测器二阶非线性误差系数。

图 7 为探测器二阶非线性误差系数取 0.1 时各算法产生的误差。比较各误差曲线可知:A 类算法对探测器非线性误差几乎完全免疫,B 类算法要受一定探测器非线性误差影响;探测器二阶非线性误差影响下 B

类算法产生的波面误差为与干涉条纹同频率的非简谐的复杂周期函数,选择的步数越多,误差越小,但误差随步数的增加减小缓慢,探测二阶非线性系数为 0.1 的情况下,B 类算法中仅 13B 算法产生的误差为 $\pm 0.1431 \text{ nm}$,可满足纳米以下检测准确度需求。

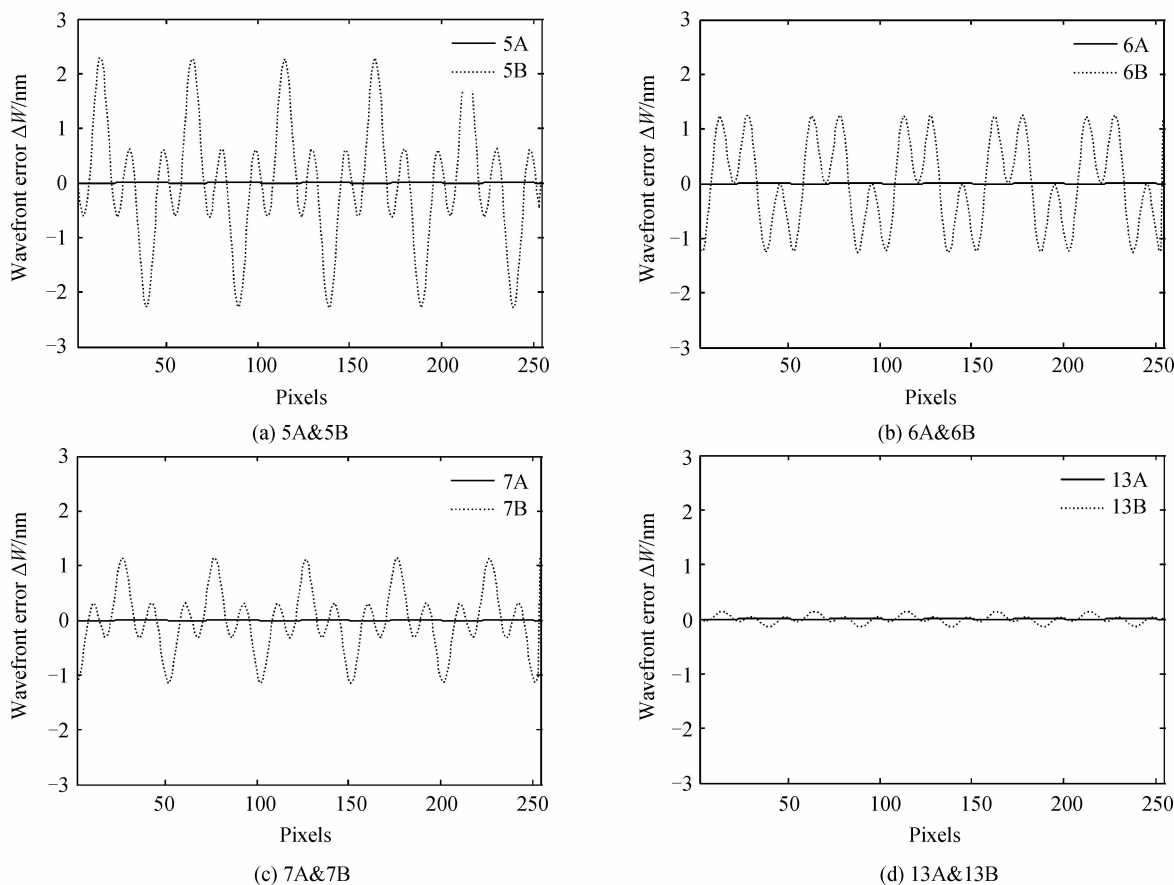


图 7 探测器非线性误差系数 $\alpha=0.1$ 时各算法产生的误差

Fig. 7 Wavefront measurement error of different algorithms which caused by 2nd detection error when $\alpha=0.1$

图 8 为 CCD 非线性误差取不同值时各算法产生的波面误差 PV 值比较。由图可见,CCD 非线性误差显著的情况下,可优先选用 A 类算法,A 类算法对 CCD 非线性误差不敏感。在 CCD 非线性误差显著的情况

下,B 类算法中选择步数越多的算法,对 CCD 非线性的误差抑制效果越好,达到一定数步数时,其影响可以忽略。对于高精度 CCD 来说,其非线性误差一般控制在 $1\% \sim 3\%$,5B 以上算法因探测器非线性产生的误差值在 2 nm 以下,因此对于常规检测来说该误差的影响可以忽略,但对纳米以下准确度检测不可忽略。

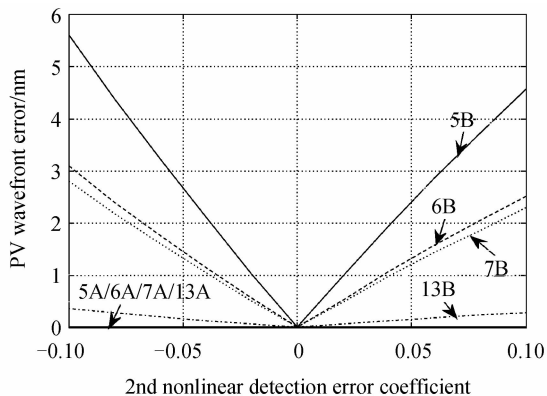


图 8 不同探测器非线性误差下各算法产生的波面误差
Fig. 8 PV wavefront measurement error of different algorithms which caused by 2nd detection error

3 结论

本文基于扩展平均技术在传统 4 步和 3 步算法的基础上推导了两类 5~13 步相移算法,给出了详细的推导过程及公式,所给出的公式可直接应用于实际干涉测量。

以 5A、6A、7A、5B、6B、7B 和 13B 算法为例,系统地比较了两类多步相移算法对 PZT 移相误差及 CCD 非线性误差的抑制特性,得出:

1) 与 A 类算法相比,B 类算法具有增强的 PZT 线性和非线性误差抑制效果,因此在 PZT 移相误差显著

情况下,可优先选用 B 类算法. 同类算法下,步数越多的算法,对相移误差的抑制效果越好. 在不考虑相移噪音情况下,选用非线性误差在 0.01%~0.02% 的高准确度 PZT 时,若选用 5B 或 6A 算法,由相移不准引入的误差一般已不超过 1 nm,可满足常规检测需求,若选用 7A、7B 及以上算法,可达到亚纳米量级,可满足纳米以下超高准确度检测需求.

2) 相移噪音引入的随机性测量误差多次测量的 PV 误差极大值要略大于相移噪音本身, A 类算法比 B 类算法对随机误差的抑制效果稍好,步数越多的算法对相移噪音的抑制效果越好,但各算法对噪音抑制效果均不明显,因而相移噪音对测量的影响不可忽略.

3) A 类算法对 CCD 非线性误差几乎完全免疫, B 类算法受一定探测器非线性误差影响,选择步数越多的算法,对 CCD 非线性的误差抑制效果越好. 对于高准确度 CCD 来说,5B 以上算法因探测器非线性产生的误差值均在 2 nm 以下,因此对于常规检测来说该误差的影响可以忽略,但对纳米以下准确度检测不可忽略.

总体说来,步数越多的算法对误差的抑制效果越好,但采集耗费的时间也越长,越易受外部随机性干扰如空气扰动等的影响而引入较大误差,因此,在保证测量准确度的前提下应尽量采用步数少的算法.

本文给出了不同误差影响下各相移算法引入的波面测量误差比较数据,研究结果可为实际干涉测量中最适相移算法的使用和选用提供理论指导及数据参考,同时也可为满足准确度需求的硬件的选用提供指导. 本文未考虑因 PZT 移相引入的离焦误差的影响,尽管该项误差会对测量误差产生很大影响,且被测件数值孔径越大,算法步数越多,引入的误差越大,但可通过一定方法进行误差补偿,该部分内容将另文进行详细探讨.

参考文献

- [1] OTAKI K, OTA K, NISHIYAMA I, *et al.* Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: Design, fabrication, and evaluation[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2002, **20**(6): 2449-2458.
- [2] OTA K, YAMAMOTO T, FUKUDA Y, *et al.* Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors [C]. SPIE, 2001, **4343**: 543-550.
- [3] GARY E S, DONALD W P, MICHAEL A J, *et al.* 100-picometer interferometry for EUVL[C]. SPIE, 2002, **4688**: 317-328.
- [4] WANG D, YANG Y, CHEN C, *et al.* Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(16): 2342-2348.
- [5] NIE L, HU M, LIU B, *et al.* Fiber Point diffraction interferometer for measuring spherical surface [C]. SPIE, 2010, **7749**: 77490B.
- [6] ZHANG Yu, JIN Chun-shui, MA Dong-mei, *et al.* Measuring technology for wavefront aberration of EUVL objective system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(12): 3384-3389.
张宇,金春水,马冬梅,等. 极紫外光刻物镜系统波像差检测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(12): 3384-3389.
- [7] WEI Hao-ming, XING Ting-wen, LI Yun, *et al.* Measurement errors in 632.8 nm high precision phase-shifting Fizeau interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041202.
魏豪明,邢廷文,李云,等. 632.8nm 高准确度移相非干涉仪测量误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 041202.
- [8] XING Ting-wen, HE Guo-liang, SHU Liang. Measurement errors in the 193 nm phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(2): 67-72.
邢廷文,何国良,舒亮. 193nm 移相点衍射干涉仪的测量误差分析[J]. 光电工程, 2009, **36**(2): 67-72.
- [9] WANG Sheng-wang, CHENG Lei, CHENG Jin-bang, *et al.* Phase-shifting error analysis of Fizeau spherical interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(10): 883-888.
黄深旺,陈磊,陈进榜,等. 斐索型球面干涉仪移相误差的探讨[J]. 光子学报, 1996, **25**(10): 883-888.
- [10] LIU Yong, SHENG Yi-bing, PENG Jian-hua. Effect of PZT phase-shifting and CCD nonlinear testing of spherical surfaces on high precision testing of spherical surfaces[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, **46**(11): 2116-2120.
刘勇,沈亦兵,彭建华. PZT 移相和 CCD 非线性对高准确度球面面形检测的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, **46**(11): 2116-2120.
- [11] MIAO Er-long, ZHANG Jian, GU Yong-qiang, *et al.* Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(08): 2029-2034.
苗二龙,张健,谷勇强,等. 用于光刻投影物镜检测的高准确度非干涉仪误差分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(08): 2029-2034.
- [12] ZEN Dan-hua, XIAO Ti-qiao, XI Zai-jun, *et al.* Detector nonlinear error and compensation in phase-stepping interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(09): 1358-1362.
曾丹华,肖体乔,席再军,等. 相移干涉仪中探测器非线性误差及其补偿[J]. 光学学报, 2006, **26**(09): 1358-1362.
- [13] SCHMIT J, CREATH K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(19): 3610-3619.
- [14] SCHWIDER J, BUTOW R, ELSSNER K, *et al.* Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(21): 3421-3432.
- [15] SCHWIDER J, FALKENSTORFER O, SCHREIBER H, *et al.* New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry [J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(8): 1883-1885.